

## 다병렬 직류배전 시스템의 DC전류 드롭 제어를 이용한 서로 다른 3상 AC/DC컨버터의 병렬운전기법

(The Parallel Operation of Each other three phase AC/DC Converter using DC Current Droop Control for Multi-parallel DC Distribution System)

이희준\* · 홍석진 · 현승욱 · 강진욱 · 김한수 · 원충연\*\*

(Hee-Jun Lee · Jin-Seok Hong · Seung-Wook Hyun · Jin-Wook Kang · Han-Soo Kim · Chung-Yuen Won)

### Abstract

DC distribution system is difficult to compose the single-system because of the capacity restriction of power semiconductors. Therefore, DC Distribution system needs parallel operation of AC/DC converters for increase to system capacity. However, this system generates the circulating current. This paper is reducing the circulating current and safely sharing the load using the proposed DC current droop control method when each other 3-phase AC/DC converter connected. This system confirms through the simulation and experiment. Also, when each other converter of parallel operate. it is compared the response characteristics

Key Words : Converter Parallel Operation, Current Sharing, Dc Distribution, 3-Phase AC/DC Converter

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 전력 반도체 소자의 비약적인 성장과 전력전자기술의 발전으로 고효율 대용량 전력 변환 장치의 연구 및 개발이 증가하고 있다. 뿐만 아니라 디지털 부하의 수요가 지속적으로 증가하고 태양광, 풍력, 연료전지 등과 같은 신재생 에너지원의 발

전이 증가하면서 직류 전원에 대한 수요가 크게 증가하는 추세이다[1-2]. 하지만 현재 전력 공급은 교류로 이루어져 있기 때문에 여러 번의 전력변환 과정을 거친 후 직류 전원을 사용한다. 이러한 전력 변환 장치는 AC/DC변환을 거쳐 DC/DC로 변환되었을 경우 전력 손실이 크게 발생하기 때문에 전력변환 시스템을 감소하여 전력을 공급하여 시스템의 효율을 상승하여야 한다.

반면 변압기를 포함하는 교류 배전 시스템은 시스템의 단일 용량을 쉽게 증가시킬 수 있는 장점을 갖는 반면에 직류 배전 시스템은 전력용 반도체의 용량 제한으로 인하여, 시스템의 단일 용량을 증가시키기 어려운 단점을 갖는다. 이러한 이유로 직류배전 시스템은 용량 증가를 위하여 병렬제어 운전이 필요하다

\* Main author : Doctor course of Electrical and engineering at sung kyunkwan Univ.

\*\* Corresponding author : Professor course of Electrical and engineering at sung kyunkwan Univ.

Tel : 031-290-7169, Fax : 031-290-4963

E-mail : jun9489@gmail.com

Received : 2015. 1. 22

Accepted : 2015. 5. 11

[3-4]. 교류시스템의 병렬운전은 전압의 위상각, 회전 방향, 전압의 크기의 동기화 제어로 가능하며, 직류 시스템의 병렬운전은 전압의 크기 동기화 제어로 가능하다. 교류시스템은 직류 시스템에 비하여 회로의 임피던스가 크므로, 병렬 연결 시 기존의 드롭 제어방식을 이용하여 쉽게 병렬제어가 가능하다. 그러나 전압형 컨버터를 갖는 직류배전 시스템은 직류링크에 커패시터를 사용하여, 직류전압의 임피던스가 작으므로 병렬 운전 시 작은 전압차이에 의하여 두 시스템 사이에 큰 돌입전류를 발생시킬 수 있고, 병렬 시스템 사이에 제어진동을 발생시킬 수 있다[5-6]. 이러한 이유로 직류배전 시스템에서 병렬운전을 하기 위하여, Master 시스템의 용량은 Slave 시스템에 비하여 시스템의 용량이 커야 한다. 또한 Master 시스템의 제어 응답은 Slave 시스템의 제어 응답보다 빠르게 제어하여야 시스템의 진동을 억제할 수 있다. 그러나 전력변환기를 사용하는 시스템은 용량 증가 시 전력용 반도체의 스위칭 주파수를 감소시킬 필요성이 있으므로 시스템의 용량과 제어응답은 반비례 관계에 있다.

따라서 본 논문에서는 서로 다른 3상 AC/DC 컨버터의 다 병렬연결에서도 순환전류를 저감하고, 전압진동을 억제하기 위하여 드롭 제어를 제안하였다. 적용된 드롭 제어는 3차 방정식을 이용하게 되며, 3차 방정식에서 사용된 계수 A의 값을 이용하여 기울기가 다른 함수 출력 값을 가지게 된다. 계수 A가 클수록 시스템 사이의 전류오차 대한 함수가 작아져 Slave 시스템의 출력 전류를 빠르게 상승시키고 작은 전류차이에서는 느리게 상승시켜 병렬운전 최종점에서 시스템 전압 진동을 제거한다.

또한 제안된 시스템의 경우 용량을 확대하기 위하여 시스템을 N개 병렬연결 시 서로 다른 컨버터에서도 운전이 가능함을 실험을 통하여 확인하였으며, 이론적 분석을 증명하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

## 2. 제안한 직류 배전 시스템

기존 병렬 시스템에서는 순환전류 저감 시 시퀀스를 이용하여 제어하거나, 전력제어, 전류제어를 통하여

순환전류를 저감할 수 있다. 병렬제어 시 전력제어 및 전류제어기법은 부하의 전력에 따라 오버슈트가 크게 발생할 수 있다. 따라서 시스템의 제어기 이득값이 민감하다. 따라서 요구된 부하의 전력에 따라 제어기의 이득 값을 변경하여야 한다.

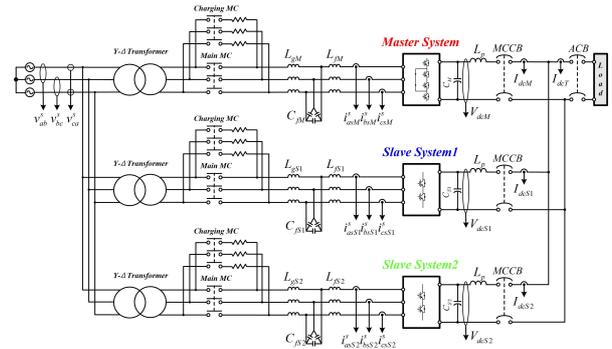


그림 1. 3병렬 DC배전 시스템의 구성도  
Fig. 1. Construction of 3-parallel DC distribution system

하지만 논문에서 적용된 드롭제어의 경우 3차 방정식을 이용하여 시스템의 전류 오차 따라 출력전류 변화를 조절하여 부하의 전력 요구사항에 관계없이 제어기 이득 값을 설정할 수 있다.

제안된 직류 배전 시스템에서 사용된 AC/DC 컨버터는 3병렬로 구성되어 있으며, Master 시스템은 3-Level AC/DC PWM 컨버터와 Slave 시스템은 2-Level AC/DC PWM 컨버터로 구성되어 있다. 구성된 직류 배전 시스템에서 사용한 AC/DC 전력변환 장치는 입출력 필터부와 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 전력변환 장치로 나뉜다. 그림 1은 DC배전 시스템의 Master 시스템과 Slave 시스템을 3병렬로 구성한 회로도이다. 초기충전 회로는 출력 커패시터 ( $IC_{VSC}$ )가 방전되어 있을 때 초기 구동 시 커패시터로 입력되는 과전류를 방지하여 컨버터의 스위칭 소자의 소손을 방지한다. 입력필터는 일반적인 LC 필터보다 고조파 감쇄효과가 좋고 부피가 작은 LCL 필터를 적용하였다.

그림 2는 제안된 시스템의 제어 알고리즘을 나타내고 있다. 제안된 시스템 제어 알고리즘은 직류배전 시스템의 병렬운전을 한다. 따라서 Slave시스템의 출력

다병렬 직류배전 시스템의 DC전류 드롭 제어를 이용한 서로 다른 3상 AC/DC컨버터의 병렬운전기법

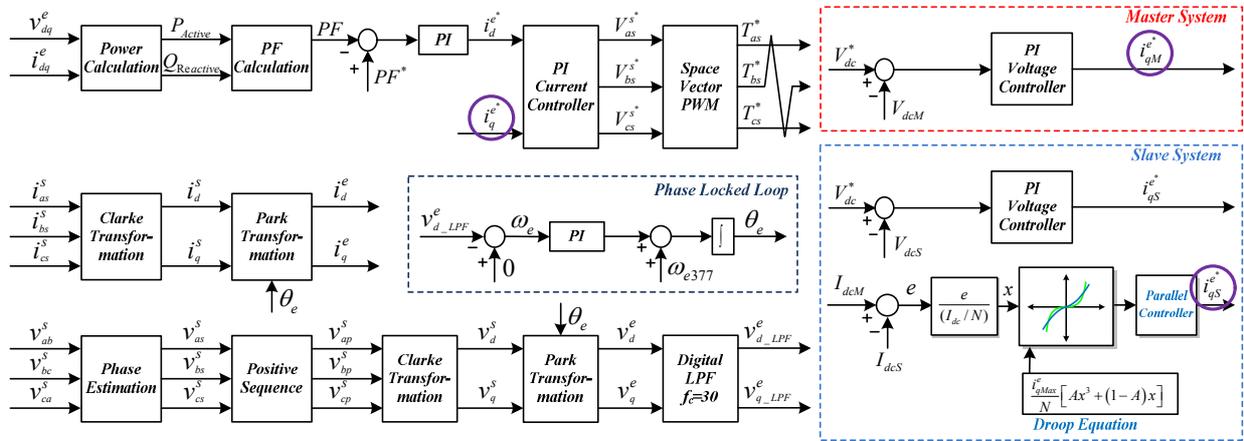


그림 2. 제안된 시스템 제어 알고리즘  
Fig. 2. The Proposed control algorithm

전압은 Master시스템의 출력 전압과 동일하게 제어한 후 두 시스템을 연계하여야 한다. 그러나 각각 다른 제어기를 갖는 시스템에서 선로 임피던스 오차, 센서 오차 등으로 측정 전압과 실제 전압은 차이가 있을 수 있다. 이러한 상황에서 Master시스템과 Slave시스템을 연계하면 시스템 사이에 순환전류가 발생한다. 특히 대용량의 전력변환 회로는 회로의 임피던스가 낮기 때문에 낮은 전압차이에서도 큰 돌입전류와 순환전류를 발생시킬 수 있다. 그러므로 순환전류 저감을 위하여 병렬 운전 시 Slave 시스템은 Master시스템과 연계시점에서 전류제어 혹은 전력제어로 전환하여 Master시스템과 연계할 필요성이 있다.

### 3. 적용된 드롭 제어 방법

#### 3.1 적용된 3차 방정식

그림 3은 상수 A값에 따라 기울기가 다른 함수 출력 값을 가지게 된다. 상수 A가 클수록 시스템 사이의 전류오차 x에 대한 함수 f(x)값은 작아져 큰 전류 차이에서 Slave 시스템의 출력 전류를 빠르게 상승시키고 작은 전류차이에서는 작게 상승시켜 병렬운전 최종점에서 Slave 시스템에 의한 Master 시스템 전압 진동을 억제할 수 있다[7-8].

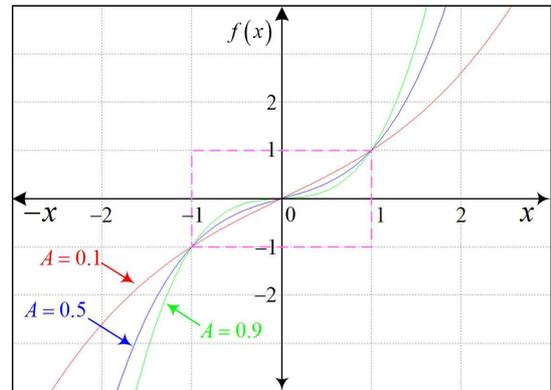


그림 3. 제안한 3차 방정식의 드롭 제어 곡선  
Fig. 3. Droop Control waveforms of proposed cubic equation

$$f(x) = Ax^3 + (1-A)x \quad (1)$$

식 (1)은 그림 2와 같이 오차 x=1인 경우 f(x)=1값을 가지고 x=-1일 때 f(x)=-1을 가지는 비선형 3차 방정식이다.

#### 3.2 직류전류 드롭 제어

병렬로 운전되는 AC/DC 컨버터 시스템은 센서의 오차, 선로 임피던스 등 제어 전압에 차이가 발생하게 되고 이에 따라 순환전류가 발생하게 된다. 이는 시스템 손실을 발생시키며 전력 품질 악화를 야기시키기

때문에 그림 4와 같이 병렬운전 시 Slave 시스템은 드롭 전류제어가 필요하다.

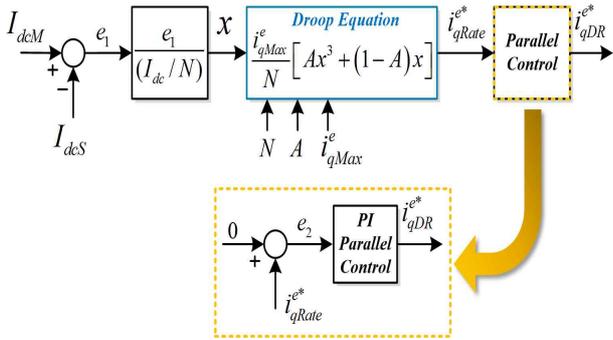


그림 4. 제안한 직류 전류 드롭제어 블록도  
Fig. 4. The control block of proposed DC current droop control

두 개의 Slave 시스템과 Master 시스템은 병렬 연계 시점에서 Master 시스템의 부하 전류와 동일한 전류를 출력할 수 있도록 드롭 전류제어를 수행한다. 3병렬 시스템은 전류 제어 시 출력 전압(700V<sub>dc</sub>)의 진동을 유발하게 된다. 이를 줄이기 위하여 Master 시스템에 비하여 Slave 시스템의 제어를 느리게 하거나 줄여야 한다.

$$\begin{cases} x = \frac{I_{dcM} - I_{dcS}}{(I_{dc}/N)} \\ f(x) = \frac{i_{qMax}^*}{N} [Ax^3 + (1-A)x] \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)는 식 (1)을 이용하여 정격용량 50kW의 Slave 시스템에 적용하기 위한 방정식이다. Master 시스템의 직류 출력전류와 Slave 시스템의 직류 출력전류 사이에 발생하는 전류 오차를 이용하여 Slave 시스템의 q축 전류를 제어하기 위하여 식 (3)과 같은 방정식을 설계한다.

### 3.3 AC/DC컨버터의 q축 지령 전류

출력 전류는 컨버터의 q축 전류를 제어함으로써 간접적으로 제어된다. 식 (3)은 전력변환기의 손실이 없을 때의 q축 전류와 출력전류의 관계식이다.

표 1. 드롭 제어기 파라미터  
Table 1. Droop Controller Parameter

Symbol	Quantity
$I_{dcM}$	Output Current(Master)
$I_{dcS}$	Output Current(Slave)
$I_{dcT}$	Output Current(Total)
$N$	Parallel Number
$x$	x-axis of cubic equation
$e_1, e_2$	error
$i_{qs}^{e*}$	q-axis reference current
$i_{qMax}^{e*}$	Maximum of q-axis current
$i_{qDR}^{e*}$	Output of Droop Controller

여기서 P<sub>AC</sub>는 교류전력, P<sub>DC</sub>는 직류전력, I<sub>S</sub>는 상전류,  $i_q^e$ 는 동기좌표에서 유효축 전류, V<sub>dc</sub>=700V, V<sub>LL</sub>=380Vrms, cosθ = 1이므로  $i_q^e \approx 1.5I_{dc}$ 의 전류비를 갖는다.  $i_{qMax}^e$ 는 정격용량에서의 q축 전류이고 N은 병렬 수이다.

$$\begin{cases} P_{AC} = \sqrt{3} V_{LL} I_S \cos\theta \\ P_{DC} = V_{dc} I_{dc} \\ P_{AC} = P_{DC} \\ \sqrt{3} V_{LL} I_S \cos\theta = V_{dc} I_{dc} \\ I_S = \frac{V_{dc} I_{dc}}{\sqrt{3} V_{LL} \cos\theta} \\ i_q^e = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_{LL}} \\ i_{qMax}^e = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{P_{AC}}{V_{LL} \cos\theta} = 107.434 [A_{pk}] \end{cases} \quad (3)$$

### 4. 병렬운전

그림 5는 제안한 시스템의 병렬운전 시 제어블록도이다. 병렬운전을 시작하기 전에 각 컨버터들의 출력 전압은 PI 전압제어를 통하여 700V<sub>dc</sub>로 제어한다.

다병렬 직류배전 시스템의 DC전류 드롭 제어를 이용한 서로 다른 3상 AC/DC컨버터의 병렬운전기법

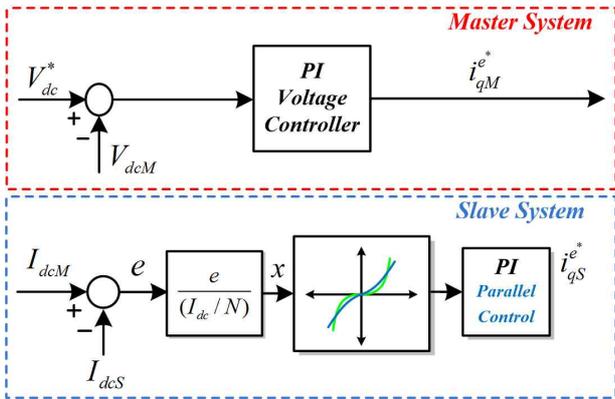


그림 5. 제안한 시스템의 병렬운전  
Fig. 5. Parallel operation of proposed system

그렇지 않고 병렬 연계 시 DC Bus전압에 진동이 발생한다. 그러므로 Slave 시스템의 응답속도는 Master 시스템의 응답속도보다 느리게 제어해야 한다. 만약 두 Slave 시스템의 응답속도가 같다면 Master 시스템의 전류 리플은 Slave 시스템의 전류리플이 증가할 것이다. 그러므로 각 Slave 시스템은 제안한 3차 방정식의 'A'를 서로 다르게 함으로써 서로 다른 응답속도를 만들어 주어야 한다.

## 5. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 5.1 시뮬레이션 결과

이론적 분석을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 하였다. 표 2는 시스템 파라미터를 나타낸다. 또한 전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 Powersim을 이용하여 블록도와 DLL을 구성하였다.

Master 시스템은 3-level PWM AC/DC 컨버터로 구성되었고 Slave 1, 2 시스템은 2-level AC/DC 컨버터로 구성하였다.

그림 6은 제안한 3병렬 시스템의 출력 전압, 전류 파형이다. 3-Level AC/DC 컨버터와 Slave 시스템 AC/DC 컨버터가 직류 배전전압을 공급하기 위하여 초기 충전 회로를 540V까지 충전 후 700V로 제어한다. 이후 드롭 제어를 통하여 병렬 제어와 부하를 연결하여 제어가 됨을 확인하였다.

표 2. 시스템 파라미터  
Table 2. System Parameter

System Parameter	Master Value	Slave Value	
Power(P)	50kW	50kW	
Input Voltage(V <sub>LL</sub> )	380V	380V	
Input frequency(f <sub>i</sub> )	60Hz	60Hz	
DC-link Voltage(V <sub>dc</sub> )	700V	700V	
Switching frequency(f <sub>sw</sub> )	5kHz	5kHz	
DC-link Capacitor(C <sub>VSC</sub> )	6800μF	10.2mF	
LCL filter	L <sub>g</sub>	120μF	700μF
	C <sub>f</sub>	50μF	50μF
	L <sub>c</sub>	500μF	1000μF

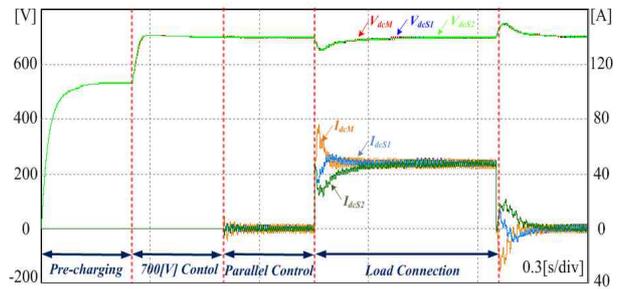


그림 6. 전체시스템의 출력 전압, 전류 파형  
Fig. 6. Output voltage and current waveforms of total system

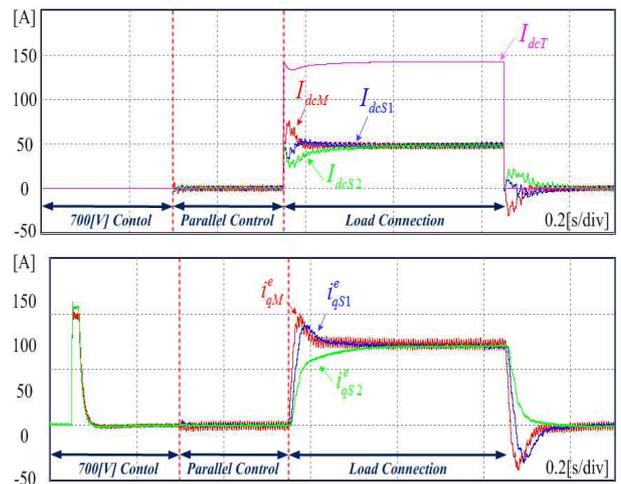


그림 7. 각 컨버터의 출력 전류와 q축 전류 파형  
Fig. 7. Output current and q-axis current waveforms of Converter

그림 7은 제안한 3병렬 시스템의 출력 전류와 q축 전류 파형이다. 부하 연계 시 Slave 1, 2는 제안한 방정식의 A 계수에 따라 서로 다른 응답속도를 가지고 동등한 부하를 감당하게 된다. 출력 전류는 q축 전류를 제어함으로써 간접적으로 제어되게 된다. 이때 Slave 1의 A 계수는 0.2이고 Slave 2의 A 계수는 0.8이다.

### 5.2 실험 결과

제안한 드롭 전류제어를 이용하여 3병렬 AC/DC PWM 컨버터를 구성하고 병렬 운전을 수행하였다.

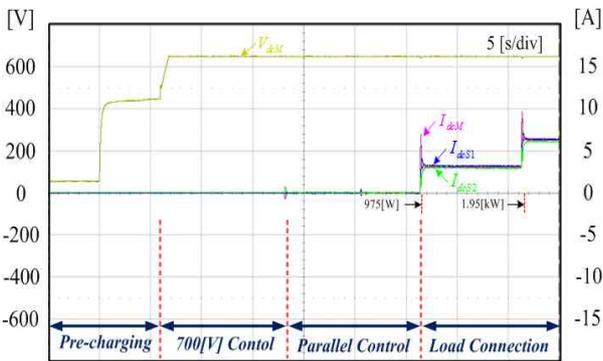


그림 8. 전체시스템의 출력 전압, 전류 파형  
Fig. 8. Output voltage and current waveforms of total system

그림 8은 제안한 드롭 전류제어를 적용하였을 때 출력 전압, 각 컨버터의 실험 파형의 출력 전류를 보여준다. 시뮬레이션과 동일하게 구성하기 위하여 시스템 동작 시 초기충전 이후 700V로 제어한다.

또한 그림 8과 같이 DC-link 전압은 일정하게 유지되고 3병렬로 연결된 컨버터의 병렬 운전과 안정적인 부하 분담함을 확인하였다.

그림 9는 전체 시스템의 출력 전압 및 전류 확대 파형이다. 각 시스템은 적용된 비선형 3차 방정식의 'A' 계수에 따라 서로 다른 응답속도를 가지는 것을 확인할 수 있다. Slave 1의 'A'계수는 0.2로 Slave 2의 'A' 계수 보다 빠른 응답속도를 가지고 부하를 감당하는 것을 확인하였다.

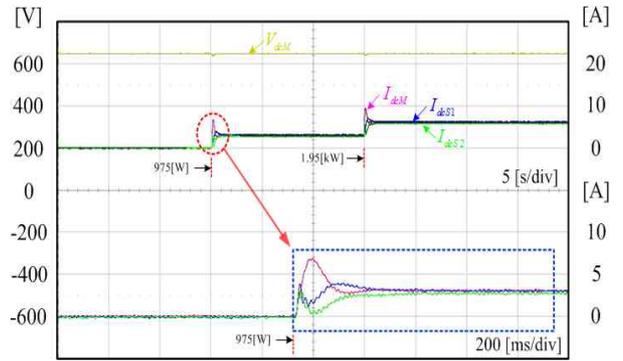


그림 9. 전체시스템의 출력 전압, 전류 확대 파형  
Fig. 9. Output current and voltage waveforms of total system

### 6. 결론

본 논문에서는 서로 다른 컨버터를 가지는 DC배전 시스템의 비선형 3차 방정식을 이용한 드롭 전류제어를 제안하였다. Slave 시스템은 q축 전류를 제어함으로써 출력 전류를 간접적으로 제어할 수 있다. 이를 이용하여 비선형 3차 방정식의 0~1 사이의 'A'계수를 조정함으로써 출력 전류의 응답속도를 제어할 수 있다. 'A'계수가 클수록 전류오차에 대한 함수 출력 값은 작아져 큰 전류 차이에서는 Slave 시스템의 출력 전류를 빠르게 상승시키고 작은 전류차이에서는 작게 상승시켜 시스템의 출력 전압 진동을 억제할 수 있으며, 시스템 간의 순환전류를 저감할 수 있다.

시뮬레이션과 실험 결과와 같이 병렬 운전 시 각 시스템 사이에 발생하는 순환전류를 저감할 수 있었다. 뿐만 아니라, 제안한 방정식의 서로 다른 'A' 계수를 가져감으로써 컨버터들은 서로 다른 제어 응답속도를 가지도록 하였다. 또한 제안된 시스템의 경우 용량을 확대하기 위하여 시스템을 N개 병렬연결 시 서로 다른 컨버터에서도 운전이 가능함을 실험을 통하여 확인하였으며, 이론적 분석을 증명하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A2A2A05006744).

## References

- [1] Faizan Dastgeer, Akalam "Efficiency Comparison of DC and AC Distribution Systems for Distributed Generation", Power Engineering Conference 2009(AUPEC), pp. 1-5, Sep. 2009.
- [2] Jenni Rekola "DC distribution and power electronics application in Smart Grids".
- [3] Duke Energy - EPRI DC Powered Data Center Demonstration Executive Summary, contact Don Kintner, EPRI communications manager. Downloaded form:.
- [4] C. Cuttle, People and windows in workplaces, in: Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand, pp. 203-212, 1983.
- [5] N.Pogaku, M. Prodanovic and T. C. Green, "modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of Inverter-Based Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.
- [6] Dong Dong, Fang Luo, Xuning Zhang, Dushan Boroyevich, Paolo Mattavelli, "Grid Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems-Part 2 : AC and DC Interface Design With Passive Components Minimization", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1667-1679, Apr, 2013.
- [7] J. W. Kim, H. S. Choi, B. H. Cho, "A novel droop method for converter parallel operation," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 1, pp. 25-32, Jan. 2002.
- [8] Soo-Choel Shin, Hee-Jun Lee, Yun-Wook Park, Seok-Jin Hong, Chung-Yuen Won, "Parallel Operation Method using New Cubic Equation Droop Control of Three-Phase AC/DC PWM Converter for DC Distribution Systems", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 19, No. 3, June 2014.

## ◇ 저자소개 ◇



**이희준**(李羲俊)

1982년 9월 30일생. 2008년 순천향대 정보통신공학부 졸업. 2011년 성균관대학교 대학원 메카트로닉스학과 졸업(석사). 현재 2015년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(박사).



**홍석진**(洪錫進)

1985년 11월 11일생. 2012년 동양미래대 자동화공학부 졸업. 2012~2014년 성균관대 대학원 메카트로닉스공학협동과정 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 태양광 시스템협동과정 박사과정.



**현승욱**(玄承旭)

1986년 9월 11일생. 2012년 안양대학교 전기전자공학과 졸업. 2012~2014년 성균관대 대학원 에너지시스템협동과정 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



**강진욱**(姜珍旭)

1988년 5월 9일생. 2014년 동양미래대 자동화공학부 졸업. 2014년~현재 성균관대 전자전기컴퓨터공학부 석박사통합과정.



**김한수**(金漢洙)

1987년 10월 07일생. 2013년 선문대학교 전자공학과 졸업. 2015년 성균관대 메카트로닉스협동과정 졸업(석사). 현재 LG전자 VC 연구소 전력전자연구파트 선임연구원.



**원충연**(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006~2009년 한국전력공사 PQ 심사위원. 2006~2009년 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술 평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010년~현재 도시철도 공사 기술검증위원. 2007~2012년 삼성전기 에너지파워 연구 센터장. 2011년~현재 한국토지주택공사 기술심사 평가위원. 2010년 전력전자학회 회장. 현재 성균관대 정보통신대학 전자전기공학부 교수.